

Definición e Integración de Procedimientos de Descenso Continuo para la Mitigación de Ruido en la Operación del TMA y del Aeropuerto de Madrid - Barajas

Rosa M^a Arnaldo Valdés

Doctora en Ingeniería Aeronáutica.

Profesor Titular Departamento de Infraestructuras, Sistemas Aeroespaciales y Aeropuertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Presidenta de la Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes Aéreos del Ministerio de Fomento de España.

rosamaria.arnaldo@upm.es

Víctor Fernando Gómez Comendador

Doctor en Ingeniería Aeronáutica.

Director Ejecutivo de Sistemas y Navegación Aérea. Ingeniería y Economía del Transporte (INECO) Madrid.

fgomez@ineco.es

Luis Pérez Sanz

Doctor en CC. Físicas.

Profesor Titular. Departamento de Infraestructuras, Sistemas Aeroespaciales y Aeropuertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

l.perez@upm.es

RESUMEN

El término Descenso Continuo en Aproximación (CDA), engloba una serie de procedimientos de aproximación cuya principal ventaja es la reducción de los impactos acústicos que se verifican en un entorno aeroportuario, durante la operación de las aeronaves. En los procedimientos CDA, la aeronave mantiene una determinada altitud hasta un punto que se define como inicio del procedimiento (TOD). A partir de este punto, la aeronave adopta una configuración que le permite realizar el descenso de forma continua, es decir, sin realizar tramos escalonados y sin variar su estado durante la aproximación. Lo anterior permite modificar la trayectoria y los perfiles de velocidades en función de la performance de la aeronave.

Debido a que uno de los objetivos principales de este tipo de operación es no actuar sobre la aeronave una vez iniciado el procedimiento, surge el problema de la compatibilidad con los procedimientos convencionales. En efecto, la prestación de servicios de Control de Tráfico Aéreo (ATC) pierde gran parte de su elasticidad, lo que plantea problemas diferentes, frente a la operación convencional.

Para tratar de paliar este problema, en el presente artículo se definen una serie de procedimientos aplicables a un aeropuerto congestionado como es el de Madrid – Barajas. Para realizar lo anterior, se recurre a la modelación matemática y al desarrollo asistido por computador de los perfiles de velocidades seguidos por la aeronave, lo que posibilita su posterior análisis e impacto sobre la operación real. También se trata el tema de la compatibilidad con los procedimientos convencionales.

ABSTRACT

The term Continuous Descent Approach (CDA), includes a number of procedures whose main advantage is to reduce noise impacts in airports environment during the aircrafts operation. In CDA procedures, the aircraft maintains a certain altitude to a point which is defined as the starting point (TOD). From this point, the aircraft adopts a configuration that allows it to decline continuously, i. e. without making staggered sections and without changing its state during the approach. This allows the

modification of the trajectory and velocity profiles based on the aircraft performance.

Since one of the main objectives of this type of operation is not acting on the aircraft once the procedure, the problem of the compatibility with conventional procedures, arise. Indeed, the provision of Air Traffic Control (ATC) loses much of its elasticity, which poses different challenges compared to conventional operation.

To try to alleviate this problem, this article defines a set of procedures applicable to congested airports such as Madrid - Barajas. To do this, it uses mathematical modeling and computer aided development of velocity profiles followed by the aircraft, enabling later analysis and impact on the actual operation. Besides, the issue of the compatibility with conventional procedures is also tackled.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Procedimiento Convencional

El procedimiento de aproximación tiene como objeto garantizar que la aeronave puede realizar una transición segura desde la fase de vuelo en ruta, hasta el aterrizaje en la pista de destino, garantizándole unos márgenes de separación de los posibles obstáculos que se pueda encontrar. En particular el controlador garantizará que la separación longitudinal que existe entre una aeronave y la precedente se mantiene dentro de unos márgenes definidos que garantizan la operación segura, evitándose problemas de alcance y afecciones de la estela turbulenta de una aeronave sobre la siguiente.

En el procedimiento de aproximación instrumental convencional se definen tres fases:

- Aproximación Inicial
- Aproximación Intermedia
- Aproximación Final

En la figura 1 se muestra el esquema de estas fases para dos aproximaciones diferentes.

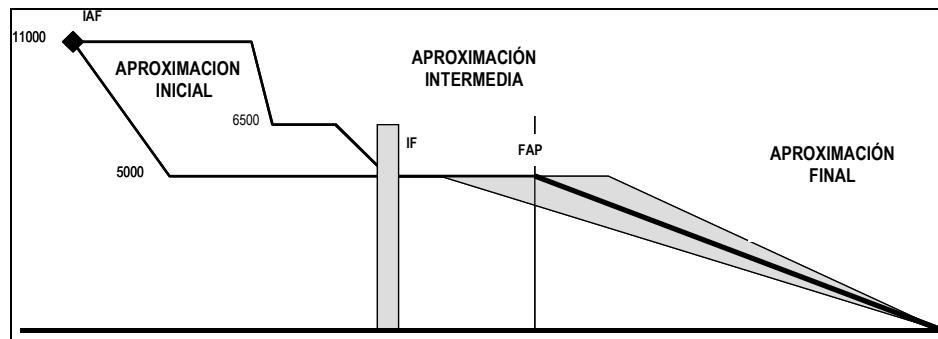


FIGURA 1: Aproximaciones Convencional a Madrid – Barajas

La fase de aproximación inicial comienza en el llamado “Punto de Aproximación Inicial” (IAF) y termina en el “Punto de Aproximación Intermedia” (IF). El objetivo de esta fase es permitir a la aeronave realizar la mayor parte del descenso necesario, por lo que se diseñan tramos con pendientes que pueden alcanzar el 8%. A la finalización de esta fase la aeronave se encuentra normalmente alineada con la pista.

La fase de Aproximación Intermedia transcurre entre el IF y el Punto de Aproximación Final” (FAP). En esta fase la aeronave realiza los cambios de configuración, con ajuste de flaps y gases para la fase final. Dado que en esta fase la carga de trabajo del piloto es mayor, normalmente será un tramo horizontal, y con longitud suficiente para que se puedan realizar todos los ajustes señalados.

En el FAP se inicia la Aproximación Final, que llevará a la aeronave hasta el umbral de la pista. En esta fase la aeronave se encuentra alineada con el eje de pista, realizando un descenso generalmente con ángulo de 3°.

Durante las diferentes fases, el procedimiento puede tener definidos puntos con velocidades límite, siendo ésta, la velocidad, un parámetro que el controlador utilizará para mantener siempre la separación longitudinal entre las aeronaves. El piloto ajustará la velocidad siguiendo las instrucciones descritas en el procedimiento o facilitadas por el controlador, dentro de los márgenes de las performances que tiene cada aeronave. Lo fundamental en este caso es que en todo momento el controlador puede estimar la posición de la aeronave y el perfil vertical de vuelo, y tratar de mantener las separaciones longitudinales y verticales correspondientes.

Por tanto, con los procedimientos de aproximación convencionales, las aeronaves operan, en el entorno de un

aeropuerto, bien a una altitud relativamente baja o descendiendo a una velocidad que puede no ser la óptima desde el punto de vista de consumo. Las aeronaves descenderán hasta alcanzar el FAP para realizar, después, una aproximación estabilizada en el entorno de los tres grados. Esto puede suceder después de haber estado la aeronave durante cierto tiempo en un determinado nivel de vuelo [8,9].

Este tipo de procedimientos, denominados convencionales, lleva a un consumo de combustible no óptimo, a una emisión de gases innecesarios y a la generación de ruido excesivo en el entorno aeroportuario [1,2,6,7]. Se presentan por tanto tres problemas ambientales relacionados con el procedimiento convencional de llegada, que se pretenden paliar, en parte, con la aplicación de procedimientos de descenso continuo [3,4,5].

1.2 Procedimiento CDA

El procedimiento CDA, aunque inicialmente fue desarrollado con la intención de reducir el consumo de combustible en aeronaves en la fase de aproximación, rápidamente mostró su eficacia en la reducción de ruido en el entorno próximo a cualquier aeropuerto.

A diferencia de los procedimientos de aproximación convencionales, los CDA evitan la utilización de segmentos horizontales durante la fase de descenso, comenzando el descenso lo antes posible a la máxima altitud, hasta iniciar la aproximación final, similar a la descrita para el caso del procedimiento convencional. La figura 2 ilustra de forma básica los procedimientos convencionales de descenso y los CDA.

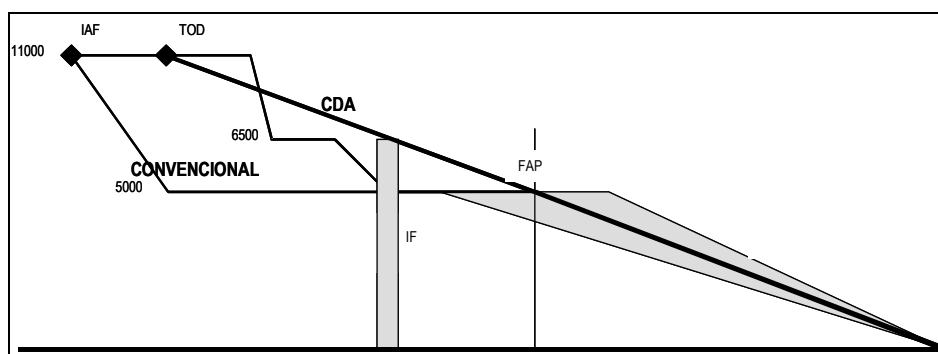


FIGURA 2: Aproximación Convencional y ACDA Aplicada a Madrid - Barajas

Con este tipo de procedimientos, al ser la altitud mayor, y el empuje de motores más reducido, se obtienen diferentes ventajas [8,20]:

- Reducción del ruido durante la aproximación y durante la estabilización de la aeronave.
- Reducción del consumo de combustible, ya que la aproximación se realiza con motores a ralentí, además de la reducción de gases contaminantes.
- Dado que la velocidad media con la que se realiza la aproximación es mayor, se produce un ligero acortamiento del tiempo en que la aeronave llega al umbral de pista. Esta característica dependerá del tipo de aeronave.

El interés de los operadores en la aplicación de este tipo de procedimientos se centra en las aproximaciones ACDA (Advanced Continuous Descent Approach). La aproximación ACDA es una aproximación CDA mejorada con tecnología avanzada, tanto herramientas de Control de Tráfico Aéreo (ATC), como herramientas de abordaje para la tripulación, con el objetivo de satisfacer las demandas de capacidad y seguridad [10,11,20].

Durante una aproximación ACDA el control de la velocidad de la aeronave por parte del controlador se restringe, ya que se establecen las condiciones al inicio del procedimiento y la velocidad viene marcada por la evolución de las condiciones dinámicas de la aeronave. La flexibilidad se pierde al no disponer el controlador de la posibilidad de utilizar la variación en la velocidad de las aeronaves para mantener la separación entre ellas.

Por otra parte, el perfil vertical de descenso, en el caso de procedimientos que no mantengan un ángulo definido, puede variar entre diferentes aeronaves, por lo que puede ser complejo tratar de estimar la posición de la aeronave para mantener separaciones verticales.

En particular, los procedimientos de mayor interés desde el punto de vista de impacto acústico y consumo son aquellos que se realizan con motores a ralentí, manteniéndose además la velocidad vertical constante o un ángulo de descenso definido.

1.3 Compatibilidad de Procedimiento ACDA con Procedimientos Convencionales

El principal problema de la aplicación de procedimientos CDA se encuentra en la compatibilidad con procedimientos convencionales, ya que, desde el punto de vista de prestación de servicios de control de tráfico aéreo, existe una problemática compleja [12]:

- El controlador no puede estimar de forma precisa el tiempo de llegada de la aeronave al punto de inicio de la aproximación final, ya que depende de la velocidad de cada aeronave para la configuración de descenso seleccionada. Esto puede plantear problemas al tratar de secuenciar tráfico de entrada a un aeropuerto.
- No se puede establecer separación vertical anticipadamente, en caso que sea necesario, ya que el perfil vertical dependerá de las performances de la aeronave.
- El controlador no dispone de información suficiente sobre las velocidades de los diferentes tipos de aeronaves, ni sobre la capacidad de acción que el comandante pueda realizar sobre ellas, teniendo en cuenta, además, los vientos dominantes.
- Una vez iniciado el descenso, no se deben modificar las condiciones establecidas para el mismo, por lo que no se podrán realizar correcciones en la trayectoria y velocidad de

la aeronave. Por tanto, las separaciones iniciales que se apliquen a dos aeronaves deben garantizar la separación mínima por estela durante todo el trayecto, manteniendo siempre las condiciones señaladas.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la utilidad de los procedimientos CDA/ACDA se encuentra en la aplicación de los mismos de forma compatible con operaciones que se estén desarrollando siguiendo procedimientos de aproximación y aterrizaje convencionales [23].

La aplicación de estos procedimientos en aeropuertos europeos (Heathrow y Schiphol) están demostrando su viabilidad, pero presentan un fuerte impacto sobre la capacidad del Sistema, por lo que su utilización se restringe a horas de baja demanda del aeropuerto [22,19,9]. Si bien garantiza menor ruido, impone mayores separaciones ATC entre dos aeronaves consecutivas, del orden del doble de las normales. Puesto que las velocidades de las aeronaves serán distintas, su separación nominal puede variar de forma importante durante el descenso: Este cambio de separaciones y la imprecisión para determinar el tiempo de llegada al FAP¹ deben tenerse en cuenta en la provisión de separaciones ATC [13, 24].

2. DEFINICIÓN DE PROCEDIMIENTO

En las diferentes fases de vuelo de la operación de una aeronave se establecen de forma clara y unívoca las condiciones en las que se deben desarrollar, de forma que, tanto el controlador como el piloto tengan conocimiento de la forma de operar y los resultados esperados.

En este sentido, definir un procedimiento de aproximación en descenso continuo exige el establecimiento de:

- Punto de inicio del procedimiento, con altitud y distancia a una referencia fija.
- Velocidad de inicio del procedimiento.
- Regla que rige el procedimiento, es decir, velocidad vertical constante o ángulo de descenso constante, y valor asociado al mismo.

En el caso de un aeropuerto congestionado, con mezcla de tráfico que realiza este tipo de aproximación y aeronaves con aproximaciones convencionales, la mayor utilidad se conseguirá cuando se defina un único procedimiento que pueda ser aplicado a un conjunto significativo de aeronaves. Es decir, fijar el punto inicial del procedimiento (TOD), con una velocidad común para un conjunto de aeronaves, y una regla de descenso común, garantizándose que todas finalizan en el mismo punto (con un determinado margen) y cada una con la velocidad necesaria para realizar la aproximación final.

Dado que el procedimiento que se define establece unas condiciones iniciales comunes a todas las aeronaves, lo normal es que estas condiciones no coincidan exactamente con las particulares de cada una de ellas. Al iniciar el procedimiento en el TOD y a la velocidad definida, el resultado será que las aeronaves no llegarán exactamente al FAP, o al menos no lo harán a la velocidad que se había definido para cada una de ellas. Es necesario entonces evaluar el error, en distancia, altura y velocidad, que cometería cada aeronave en la llegada al FAP, con el fin de evaluar si, desde el punto de vista operativo, puede ser admisible esta situación. Para ello, se define posteriormente el margen que se admitirá en estas tres variables (altura, distancia y

¹ FAP (Final Approach Point): Punto de inicio de la aproximación final en un procedimiento de precisión.

velocidad) en la llegada al FAP que pueden considerar operativamente aplicables.

Con el fin de evaluar esta situación es necesario modelizar en detalle la trayectoria y la velocidad de las aeronaves al realizar el procedimiento, utilizándose para ello la aplicación desarrollada en la Universidad Politécnica de Madrid como parte de los proyectos de investigación iniciados [21].

2.1 Aplicación al Escenario Operativo de la Aproximación de Madrid – Barajas. Consideraciones Generales

El presente análisis de la utilización de procedimientos ACDA se realiza utilizando como escenario de análisis el Área Terminal de Maniobras (TMA) de Madrid, y en particular las aproximaciones a Madrid – Barajas en configuración Norte [16].

El procedimiento ACDA se pretende que conviva operativamente con la configuración operativa del TMA de Madrid, por lo que se parte de una serie de condiciones iniciales [14, 15, 16]:

- El objetivo será definir un único procedimiento ACDA, que debe ser tal que pueda ser operado por un alto porcentaje de las aeronaves que conforman la flota que opera en Barajas.
- Los puntos de inicio del procedimiento ACDA (TOD) se encontrarán sobre las rutas estándar de llegada (STAR), y siempre que la aeronave haya superado el punto de inicio de la Aproximación Inicial (IAFs).
- El punto final del procedimiento ACDA será el punto de inicio de la aproximación final (FAP) de la aproximación a la pista 33 de Barajas. Este punto se encuentra localizado a 5000 pies de altitud (2000 pies sobre el umbral de pista) y a 9,46 millas náuticas (NM) del umbral.
- En el actual TMA se establece que en los IAFs la aeronave mantiene 11000 pies como altitud mínima de vuelo, por lo que la altitud de inicio del procedimiento será ésta o superior. Para evitar posibles interferencias con vuelos de salida, es recomendable no comenzar el procedimiento a una altitud superior, por lo que en los casos que se analizan siempre se toma como altitud de inicio 11000 pies.
- Teniendo en cuenta que Madrid dispone de dos puntos de inicio (IAF), las longitudes máximas de los procedimientos serán 27,3 NM y 29,3 NM, dependiendo del IAF de inicio, considerando la distancia entre éstos y el FAP.
- En el TMA se ha definido una limitación de velocidad de 220 Kt a la salida de los IAFs, por lo que la velocidad de inicio del procedimiento ACDA deberá ser ésta como máximo.

El procedimiento de descenso continuo (ACDA) finaliza cuando la aeronave alcanza el FAP, siguiendo a partir de este punto el tramo final de la aproximación, siendo por tanto este tramo común con el procedimiento convencional.

2.2 Definición de Procedimiento ACDA con Velocidad Vertical Constante

En el procedimiento ACDA con velocidad vertical constante el objetivo será, una vez la aeronave alcance el punto definido de inicio del procedimiento (TOD), a una velocidad dada y con un régimen de descenso fijado y constante (velocidad vertical), mantener motores a ralentí para descender, teniendo como finalidad alcanzar el FAP a la velocidad correspondiente para realizar la fase de aproximación final, que debe ser un 30% superior a la de pérdida en la correspondiente configuración de flaps de aterrizaje.

En trabajos anteriores desarrollados por la UPM (Universidad Politécnica de Madrid) se ha desarrollado un modelo que, utilizando la Ecuación de la Energía Total (TEM), modeliza matemáticamente el descenso de las aeronaves. Este modelo permite establecer los perfiles verticales, velocidad, empuje y resistencia aerodinámica de una aeronave que realiza un operación ACDA (de ángulo o velocidad vertical constante). El modelo se alimenta con parámetros de consumo y resistencia aerodinámica obtenidos de la base de datos BADA de Eurocontrol y permite recrear esta operación para cualquier modelo de aeronave. Este modelo ha sido calibrado mediante comparación con perfiles de trayectorias ACDA realizadas por B738 y A321.

Utilizando la aplicación desarrollada por la UPM para modelizar la evolución de los perfiles vertical y de velocidad de cada aeronave en estas configuraciones [21], se obtendrá la evolución de los mismos hasta alcanzar el final del descenso, que se producirá en uno de los tres casos siguientes, reflejados en la figura 3:

- Caso 1. La aeronave alcanza la altitud establecida para el FAP, 5000 pies.
- En el caso 2, la aeronave alcanza la longitud marcada por el procedimiento, es decir, llega al FAP.
- En el caso 3, la aeronave alcanza la velocidad de final del procedimiento (1,3 veces la velocidad de pérdida en configuración de aterrizaje).

Dado que las aeronaves, con carácter general, no cumplirán exactamente las condiciones establecidas en el FAP, es necesario definir unos valores límites de desviación entre estas condiciones y las que tenga la aeronave en la finalización del procedimiento. De esta forma, se considera que una aeronave puede realizar un procedimiento ACDA, definido por unas condiciones en el TOD, cuando alcanzado el punto de finalización del mismo, en cualquiera de los tres casos expuestos anteriormente, se cumplen las tres condiciones siguientes:

- La distancia horizontal entre el punto de finalización del descenso y el FAP es inferior a 1NM.
- La distancia vertical entre el punto de finalización del descenso y el FAP es inferior a 1000 pies.
- La diferencia entre la velocidad en el punto de finalización del procedimiento y la definida para el FAP (1,3 veces la velocidad de pérdida en aterrizaje) es inferior al 15% de ésta.

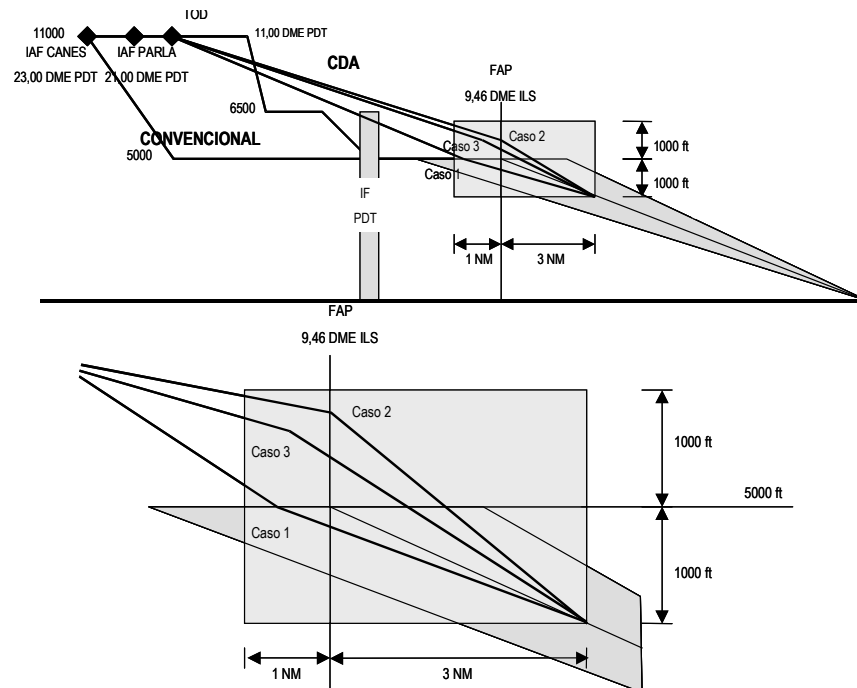


FIGURA 3: Buffer ACDA con Representación de Procedimiento ACDA y Convencional

Para continuar el procedimiento con la fase de aproximación final, se define un punto de la trayectoria de esta fase, de forma que una vez que la aeronave finaliza el procedimiento ACDA, evoluciona para llegar al mismo a la velocidad de aproximación establecida para este avión. El punto de interceptación se ha definido a 4000 pies (1000 pies por debajo del FAP) y a 3NM de éste, de forma que la aeronave, en caso necesario, pueda adaptar sus condiciones a las necesarias para el FAP².

Por tanto, para adaptar el procedimiento ACDA al tramo final de la aproximación, es necesario establecer un volumen de espacio aéreo de transición definido de la siguiente forma:

- Los límites verticales serán 1000 pies por encima y por debajo del FAP.
- Los límites longitudinales serán 1NM previa al FAP y 3NM pasado este punto.

En la figura 3 se muestra el espacio aéreo definido para la transición en la operación.

2.2.1 Simulación del Procedimiento

Dependiendo de las condiciones operativas del escenario, las condiciones iniciales y los parámetros que definan el desarrollo del procedimiento, deben de definirse de forma común para un porcentaje elevado de aeronaves, de forma que sea posible utilizarlo por una flota representativa del aeropuerto.

Se han realizado diferentes pruebas analizando cómo varían los resultados para cada aeronave ante la modificación de las condiciones iniciales, analizándose los resultados en cuanto a desviaciones en longitud, altura y velocidad, para alcanzar las condiciones del FAP para cada modelo de aeronave [21]. De este conjunto de pruebas, se ha seleccionado aquella que hace que el mayor porcentaje de tráfico de la flota de tipo de Barajas [17],

pueden realizar el procedimiento, llegando al FAP dentro de los márgenes definidos. Este procedimiento es:

Inicio del procedimiento a 220 kt, con una velocidad de descenso de 900 ft/min, iniciándose a 20NM del FAP y 11000 ft de altitud.

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos, donde aparece, para el grupo de aeronaves representativo en este aeropuerto [17]:

- Modelo de aeronave.
- V_{fap}: Velocidad a la que debería llegar al FAP (recordemos que será 1.3 V_{STALL})
- Err_v: Error nominal en velocidad (en nudos) que se comete. Si el error es negativo significa que ha llegado al final del procedimiento con velocidad superior a la definida. En el caso de la velocidad se muestra este error en porcentaje sobre la velocidad nominal necesaria, para que pueda valorarse el efecto.
- Err_h: Error nominal en altura (en metros). Si es negativo, implica que la aeronave aun no ha llegado a los 5000 pies al finalizar el procedimiento.
- Err_x: Error nominal en distancia (en NM). Al igual que los anteriores, valores negativos implican que la aeronave aun no había recorrido el total de la longitud definida en el procedimiento.
- Finalmente se muestra el tiempo nominal (en segundos) que la aeronave ha empleado para recorrer la trayectoria entre el IAF y el punto final de procedimiento.

Al ser un procedimiento con velocidad vertical constante, si todas las aeronaves llegasen a 5000 pies, tardarían el mismo tiempo en realizar el procedimiento desde el IAF, ya que inicialmente será un tramo recto a velocidad constante (220 kt) hasta llegar al TOD. El tiempo total, en el caso de PARLA, en el tramo recto a 220 kt es de 119 sg, mientras que el descenso completo se realiza en 400 sg. La diferencia, aunque pequeña, se produce al no llegarse en todos los casos a esta altura, como se ha explicado anteriormente.

² Estos valores se han tomado para que el punto que se define se encuentre en la trayectoria de descenso definida por la senda del ILS, de forma que si una aeronave llega al FAP continúe el procedimiento de aproximación ILS definido para la pista 33.

TABLA 1: Errores en Velocidad, Altitud y Distancia en la Llegada al FAP

	Vfap (kt)	err_v (%)	err_h (m)	err_x (NM)	T (s)
A300.	130,0	-21,5	-54,9	0,0	504
A310.	140,4	-17,3	-86,9	0,0	497
A320.	136,5	-3,2	0,0	-0,4	517
B727	143,0	-0,2	-105,2	0,0	493
B737.	133,9	-5,9	-169,2	0,0	479
B757.	139,1	-14,8	-160,1	0,0	481
B767.	146,9	-0,5	0,0	-0,3	514
MD80.	145,6	1,7	-77,7	0,0	499
B707	124,8	-20,8	-350,9	0,0	483

Como se puede observar en la tabla, del conjunto de aeronaves que componen la flota significativa del aeropuerto de Madrid-Barajas [17], únicamente 6 ofrecen unas desviaciones en longitud, altura y velocidad dentro de los márgenes definidos. En el caso del A300 y A310 las velocidades con las que las aeronaves llegan al final del procedimiento se encuentran muy por encima de la establecida para la aproximación final, siendo necesario entonces reducir mucho la velocidad en el área de transición, por lo que hacen que no sea aconsejable la selección de estas aeronaves. En el caso del B707, además de llegar con una velocidad elevada, el error en altura es superior a 300 m (1000 ft), lo que hace desaconsejable la operación de este procedimiento. Inicialmente se podría haber esperado este resultado, ya que el A300, A310 y B707 son aeronaves pesadas, cuyos parámetros y comportamiento será muy diferente al resto, que son aeronaves medias.

A la vista de los resultados, todas las aeronaves tienen un error en altura negativo, es decir, no llegan a alcanzar la altura del FAP, lo que podría hacer pensar que deberían iniciar el procedimiento por debajo de 11000 pies. Sin embargo hay que recordar que por procedimientos, en el TMA de Madrid no está permitido volar por debajo de esta altitud en este punto, por lo que se debe mantener el inicio en el punto seleccionado.

Por tanto, en el caso de ACDA con velocidad vertical constante, se opta por un procedimiento que se inicia a 11000 pies, a 20 NM del FAP, velocidad inicial del procedimiento de 220 Kt y velocidad vertical de descenso de 900 ft/min. Este procedimiento podrá ser volado por el A320, B727, B737, B757, B767 y MD80, conjunto de aeronaves que en la operación de Madrid – Barajas supone el 68,9% de la flota³.

La modelización de las trayectorias y velocidad, para este conjunto de aeronaves ofrece los siguientes perfiles verticales y de velocidad.

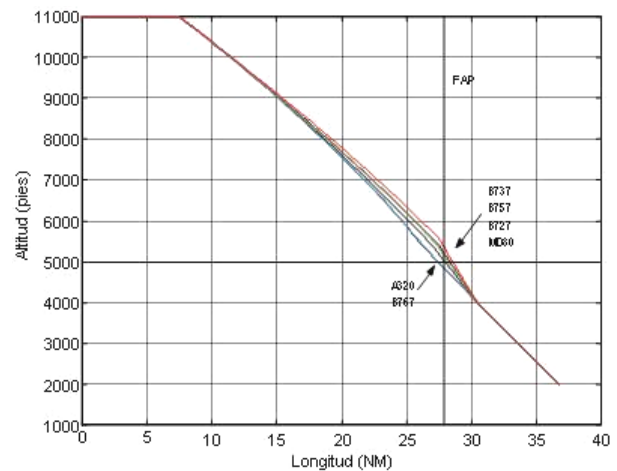


FIGURA 4: Perfil Vertical de Aeronaves con ACDA/V

Como se puede observar, en este caso se abandonaría el IAF a 11000 pies, manteniendo la altitud durante 7,3 NM, punto en el que se iniciaría el procedimiento. Con el modelo establecido, las trayectorias de las aeronaves mantienen un régimen de descenso a una pendiente casi constante, hasta llegar al FAP. En el caso del A320 y B767, se alcanzan los 5000 pies antes de llegar a este punto, instante en el que finaliza el procedimiento. El modelo hace que todas las aeronaves adaptan su configuración para llegar a un punto situado 1000 pies por debajo del FAP y a 3NM, instante en el que se continua con la fase final del procedimiento de aproximación publicado para la pista 33, que es ya común para el conjunto de aeronaves. El aterrizaje finaliza a 1933 pies, altitud declarada del umbral de la pista 33 de Barajas.

Estos resultados son coherentes con los datos de la Tabla 1, en la que se puede apreciar que únicamente el A320 y el B767 tenían error horizontal, ya que el resto ha alcanzado la distancia del FAP antes de alcanzar su altitud correspondiente. Por el contrario, los dos únicos que no presentan error en altitud son estas dos aeronaves, que llegan a este valor antes de alcanzar la distancia correspondiente.

El perfil de velocidades, para el conjunto de aeronaves seleccionado, se muestra en la figura 5.

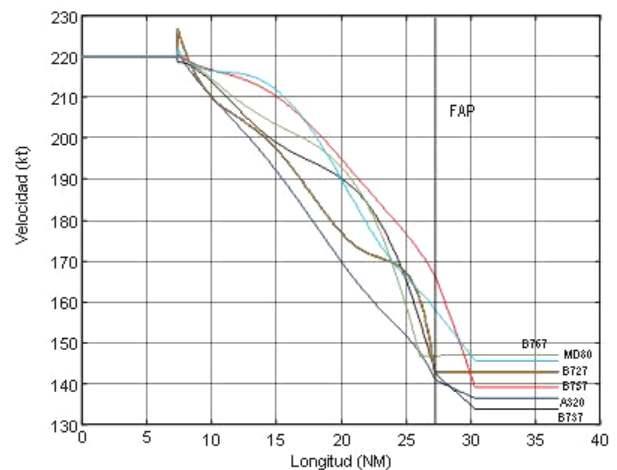


FIGURA 5: Perfil de Velocidad Verdadera Aeronaves con ACDA/V

³ Hay que señalar que dentro del grupo seleccionado, el B757 tiene un error en velocidad de llegada al FAP (14,9%) muy próximo al límite que habíamos fijado del 15%, por lo que es previsible que esta aeronave sea la que peor se ajuste a los parámetros seleccionados para el procedimiento.

La variación de la velocidad con la distancia, en la mayoría de los casos presenta cuatro tramos diferentes, desde un punto de vista cualitativo. La longitud de cada tramo es diferente para cada una de las aeronaves que realizan la aproximación, por lo que no se pueden asociar a distancias concretas:

- Inicialmente se inicia con un determinado régimen de variación con la distancia, diferente para cada uno de los aviones, marcado por las características de la aeronave en configuración limpia.
- Cuando se alcanzan las condiciones que aconsejan el cambio de configuración, con el despliegue de flaps, se produce una variación en este régimen de descenso, y generalmente a partir de este punto todas las aeronaves suelen presentar un mayor gradiente de descenso de velocidad con la distancia.
- En todas las aeronaves se puede identificar el punto en el que se finaliza el procedimiento, y dado que, como se ha señalado previamente, en la mayoría de ellas se llega a este punto con una velocidad superior a la definida, se produce una variación lineal de forma que en el punto definido para continuar la fase final cada una llegue a la velocidad de aproximación. En el caso del B727 y el B767 se mantiene prácticamente constante, ya que se llega prácticamente sin error en velocidad.
- El tramo final de la aproximación, se produce a velocidad constante, definida para cada aeronave (recordemos que será $1.3 V_{STALL}$), hasta llegar al umbral de pista.
- La aeronave que más se aleja de su configuración ideal es el B757, con un error en velocidad de casi el 15% y un error en altura de 160m, por lo que es previsible que sea la que peor se adapte a las condiciones generales de grupo.

El A320, es el que más tiempo emplea en realizar el procedimiento, por lo que la velocidad media durante el mismo es inferior al resto.

Este conjunto de conclusiones deberán tenerse en cuenta cuando se desarrollen y apliquen estos procedimientos, de forma que se definan distancias de separación que garanticen la operación segura de la aeronave.

2.3 Definición del Procedimiento ACDA de Ángulo de Descenso Constante

En el caso del procedimiento ACDA con ángulo de descenso constante el objetivo será, una vez la aeronave alcance el punto definido de inicio del procedimiento (TOD), a una velocidad dada y con un pendiente de descenso fijada (ángulo de descenso), mantener motores a ralentí para descender, teniendo como finalidad alcanzar el FAP a la velocidad correspondiente para realizar la fase de aproximación final. Al igual que en el caso anterior, el procedimiento debe ser compatible con la actual operación del TMA de Madrid, manteniendo las condiciones iniciales señaladas anteriormente, y que pueda ser volado por un porcentaje elevado de la flota.

Al fijar el ángulo de descenso se está definiendo la trayectoria que seguirán la aeronaves, independientemente del modelo y performances. De esta forma se está obligando a sobrevolar el FAP, por lo que en este caso la finalización del procedimiento se producirá en dos situaciones:

- Si la aeronave alcanza la velocidad definida para la aproximación final en el FAP antes de llegar a éste⁴, se

finaliza el procedimiento, evaluándose entonces la desviación en altura y distancia que se ha cometido en este punto. Si éstas son inferiores a 1000 pies y 1NM respectivamente, se considera aceptable para volar el procedimiento.

- Por el contrario, si la aeronave no alcanza el valor establecido para la velocidad, siempre pasará por el FAP, por lo que el error en distancia y longitud será nulo de forma simultánea. Como se puede ver en la tabla 2 el error en altura no es nulo en algunos casos como consecuencia de la aproximación polinómica que se realiza de la función de velocidad de la aeronave. En este caso la diferencia en velocidad debe ser inferior al 15% del valor objetivo, para considerarse que la aeronave puede volar el procedimiento.

Como se puede ver en la tabla 2 el error en altura no es nulo en algunos casos como consecuencia de la aproximación polinómica que se realiza de la función de velocidad de la aeronave.

2.3.1 Simulación del Procedimiento

Teniendo en cuenta el entorno operativo del escenario, se trata de definir un procedimiento cuyas condiciones de realización sean compatibles con un elevado porcentaje de aeronaves de la flota de Barajas.

Al igual que en el caso anterior, el estudio se ha realizado para el conjunto de la flota de este aeropuerto, buscando aquellos procedimientos que ofreciesen unas desviaciones, al alcanzar el punto de aproximación final, en altitud, distancia y velocidad, que estuviesen dentro de los márgenes establecidos.

Del conjunto de pruebas realizadas [21], se ha seleccionado aquella que hacen que el mayor porcentaje de tráfico de la flota de tipo de Barajas [17] puedan realizar el procedimiento, llegando al FAP dentro de los márgenes definidos. Este procedimiento es:

Inicio del procedimiento a 215 kt, con un ángulo de descenso de 2,6°, iniciándose a 21,8 NM del FAP.

Como era de esperar tras las conclusiones obtenidas en el procedimiento anterior, en el caso del A300, A310 y B707, los resultados obtenidos de la Tabla 2 recomiendan no seleccionar estos aviones para el procedimiento. En el caso del A300, la velocidad límite se alcanza antes de llegar al FAP, finalizándose el procedimiento a mayor distancia del FAP de la considerada como recomendable (400 pies y 1,4 NM respectivamente). En el caso del A310 y B707, al llegar la aeronave al FAP aun no ha perdido suficiente velocidad, siendo ésta superior en mas del 15% del valor definido para este punto.

Salvo el A310 y B707, no existe una aeronave que destaque sobre el resto en el error cometido. Atendiendo al error en velocidad el B757 y MD80 alcanzan los mayores valores, pero en el caso de la altura y distancia es el B737.

TABLA 2: Errores en Velocidad, Altitud y Distancia en ACDA/A (Ángulo Constante)

	V _{fap} (kt)	err_v (kt)	err_h (m)	err_x (NM)	T (s)
A300.	130,0	7,8	-122,3	-1,4	506
A310.	140,4	-15,9	0,4	0,0	493
A320.	136,5	5,1	-29,3	-0,3	499
B727	143,0	-2,2	0,5	-0,0	489
B737.	133,9	2,2	-39,1	-0,4	494
B757.	139,1	-8,4	0,9	0,0	480
B767.	146,9	3,2	-28,4	-0,3	482
MD80.	145,6	-8,1	0,0	0,0	497
B707	124,8	-17,0	-1,5	0,0	473

⁴ Recordemos que aunque la velocidad en el FAP se define como $1.3 V_{STALL}$ se permite que la aeronave llegue hasta $1.2 V_{STALL}$ considerándose que después recupera la velocidad necesaria.

En el caso del A320, B737 y B767, la velocidad del FAP se alcanza antes de llegar a éste, por lo que finalizará antes el procedimiento, continuando a partir de este punto el tramo definido para llegar al punto de inicio de la aproximación final⁵. Esta es la causa que se produzca un error en distancia y altitud en el FAP.

Por tanto, en el caso de ACDA con ángulo de descenso constante, se opta por un procedimiento que se inicia a 11000 pies, con un ángulo de descenso de $2,6^\circ$ (que define una longitud del procedimiento de 21,8NM), con una velocidad inicial del procedimiento de 215 Kt. Este procedimiento podrá ser volado por el A320, B727, B737, B757, B767 y MD80, conjunto de aeronaves que en la operación de Madrid – Barajas supone el 68,9% de la flota.

En el caso del ACDA de ángulo constante, la representación del perfil vertical refleja una única trayectoria, definida por la pendiente de descenso, que llega hasta el FAP y continua el tramo final del procedimiento de la pista 33.

En la figura 6 se muestra el perfil vertical para el conjunto de aeronaves señalado, común para todas ellas, tomando como origen el IAF. Se abandonaría este punto a 11000 pies, manteniendo la altitud durante 5,5 NM, punto en el que se iniciaría el procedimiento. Dado que el ACDA se ha definido con una pendiente de $2,6^\circ$ y la trayectoria final se realiza con una pendiente de 3° , se puede apreciar un pequeño cambio en el perfil vertical en los 5000 pies, instante en el que se alcanza el FAP y se modifica esta trayectoria. El aterrizaje finaliza a 1933 pies, altitud declarada del umbral de la pista 33 de Barajas.

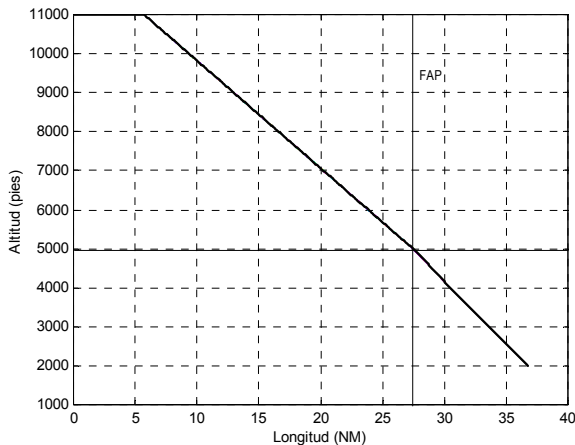


FIGURA 6: Perfil Vertical de ACDA/A

En el caso de la velocidad, la figura 7 muestra la evolución de ésta con la distancia recorrida desde el IAF, con los mismos cinco tramos definidos en el procedimiento anterior.

- Velocidad constante entre el IAF y el TOD.
- Reducción lenta de la velocidad en configuración limpia.
- Cambio de gradiente de velocidad al desplegar flaps.
- Fin del procedimiento, bien por llegar al FAP (caso de B727, MD80 y B757), en cuyo caso la velocidad disminuye linealmente hasta el punto en el que se continúa el procedimiento de aproximación, o bien por alcanzar el valor límite de velocidad (caso de B737, A320 y B767),

necesitándose entonces mantener o recuperar velocidad hasta la aproximación final.

- El tramo final de la aproximación, a partir de 30,3 NM, se produce a velocidad constante, definida para cada aeronave (recordemos que será $1.3 V_{STALL}$), hasta llegar al umbral de pista.

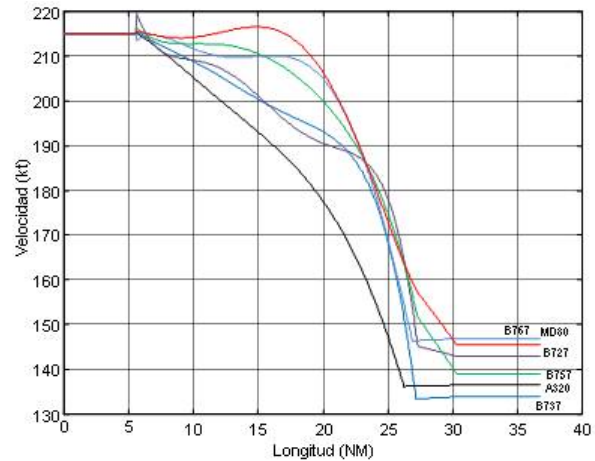


FIGURA 7: Perfil de Velocidad de ACDA/A

Conviene destacar que en el ACDA de ángulo de descenso constante, el conjunto de aeronaves seleccionado realiza el procedimiento en unos tiempos muy similares, alrededor de 490 segundos, por lo que la velocidad vertical media de descenso es muy similar en el conjunto de estas aeronaves. La homogeneidad en el tiempo del procedimiento será importante al definir las separaciones entre las aeronaves ACDA y las convencionales, ya que si emplean el mismo tiempo, se podrán definir valores de separación válidos para el conjunto de aeronaves que operan en ACDA.

CONCLUSIONES

En los últimos años se ha demostrado en diferentes grupos de trabajo, que los procedimientos ACDA de velocidad vertical constante se plantean como una medida eficaz para la minimización del impacto acústico en el entorno de los aeropuertos aumentando además la eficiencia de la operación de la compañía.

Como se ha señalado en el presente texto, el principal problema que presenta la implantación de este tipo de procedimientos es la imposibilidad de ajustar tiempos y velocidades para garantizar la separación entre aeronaves, ya que en la prestación de servicios ATC el controlador no podrá actuar sobre la aeronave para modificar sus condiciones. Para paliar este problema, el trabajo desarrollado define un procedimiento ACDA, de forma que establecidos los parámetros del mismo de una forma común para un porcentaje significativo de la flota de operación en un aeropuerto, las aeronaves alcancen el FAP en las condiciones necesarias para volar la aproximación final, siempre evitando la actuación del controlador.

En el caso del aeropuerto de Barajas, el presente trabajo obtiene unas condiciones que, para las aeronaves A320, B727, B737, B757, B767 y MD80 (68,9% de la flota de Barajas) se permite volar dos procedimientos ACDA:

⁵ Esta es la causa que parezca un error en distancia y altitud en el FAP. En la representación de las trayectorias este hecho no se refleja, pues la aeronave a partir de este punto continúa un descenso a ángulo constante, diferente al del procedimiento pero muy próximo a éste, por lo que la variación es inapreciable.

- Procedimiento de Velocidad vertical de descenso constante:

Saliendo del IAF a 11000 pies y 220 kt, manteniendo la velocidad y altitud hasta 13,7 NM de PDT, iniciar el descenso con motor a ralenti y velocidad vertical de 900 ft/min,

- Procedimiento de Ángulo de descenso constante

Saliendo del IAF a 11000 pies y 215 kt, manteniendo la velocidad y altitud hasta 15,5 NM de PDT, iniciar el descenso con motor a ralenti y ángulo de descenso de 2,6°.

Al modelizar las trayectorias y velocidad es de estos procedimientos, se ha obtenido como resultado que el ACDA de velocidad vertical constante se realiza con pendientes constantes para cada aeronave, aunque ligeramente diferentes entre ellas, mientras que el ACDA de ángulo constante se realiza con velocidades verticales medias muy similares entre estas aeronaves. Este dato queda reflejado en el hecho que el tiempo que emplean las aeronaves, en este procedimiento, en descender de 11000 pies a 5000 pies es muy parecido en todas ellas.

De esta forma, se han obtenido unos tiempos de vuelo del procedimiento muy similares entre las aeronaves, hecho que permitirá la definición de separaciones únicas entre éstas y las que operen según el procedimiento convencional, cuyo cálculo será necesario realizar previo a la implantación de estos procedimientos, como garantía de seguridad de la operación.[18].

REFERENCIAS

- 1.- Visser, H.G. Generic and site-specific criteria in the optimisation of noise abatement trajectories. *Transportation Research Part D* 10 (2005) 405-419.
- 2.- Clarke J.P. The role of advanced air traffic management in reducing the impact of aircraft noise enabling aviation growth. *Journal of Air Transport Management* 9 (2003) 161-165.
- 3.- Upham P, Callum T., Gillingwater D., Raper D. Environmental capacity and airport operations: current issues and future prospects. *Journal of Air Transport Management* 9 (2003) 145-151.
- 4.- Upham P, Callum T., Raper D., McLellan M., Lever M., Lieuwen. Environmental capacity and European air transport: stake holder opinion and implications for modelling. *Journal of Air Transport Management* 10 (2004) 199-205.
- 5.- Janic M. Modelling operational, economic and environmental performance of an air transport network. *Transportation Research Part D* 8 (2003) 415-432.
- 6.- Carlsson F., Lampi E., Martinsson P. The marginal values of noise disturbance from air traffic: does the time of the day matter?. *Transportation Research Part D* 9 (2004) 373-385.
- 7.- Galilea P. Ortúzar J. Valuing noise reductions in a residential location context. *Transportation Research Part D* 10 (2005) 305-322.
- 8.- Caetano T., Hoffman E., Zeghal E. AIAA-2001-4174. Model-based evaluation of merging operations in sequence of aircraft EUROCONTROL Experimental Centre, BP 15, 91222 Bretigny, France.
- 9.- Carlson, P., Allocating Banks of Flights to Arrival Slots in Reduced-Capacity Situations, CSDL-T-TBD, C.S. Draper Laboratory, Master's Thesis, MIT, Cambridge, Mass., June 1997.
- 10.- Caves R E, Kershaw A D, Rhodes D P, Operations for airport noise control: Flight procedures, aircraft certification and airport restrictions, *Transport Research Record* 1662, Transportation Research Board, Washington, 1999.
- 11.- Erkelens, Louis J.J., 2000, "Research into New Noise Abatement Procedures for the 21st Century," AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, AIAA-2000-4474, August 2000.
- 12.- EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE. Revolutionary versus evolutionary strategies: the future of air traffic management service provision from a supply chain perspective. "Analysis of the supply chain of air traffic management". EEC Note No 12/02.
- 13.- Hoffman, E., Contribution to aircraft performance modelling for ATC use, Eurocontrol Experimental Centre Report 258, 1993.
- 14.- INECO Aplicación al Caso del Espacio Aéreo de Madrid. Proyecto ENAM. TAREA B2: ANÁLISIS COMPARADO DE ESPACIOS AÉREOS DE VARIOS AEROPUERTOS. Código: EDI 1024.100.
- 15.- INECO Documento de Evaluación del Estado Actual del Sistema de Navegación Aérea. Proyecto ENAM. TAREA B1: Navegación Aérea: Situación actual y evolución previsible Código: EDI 1010.100.
- 16.- INECO. Análisis y Selección de Escenarios Proyecto ENAM. TAREA B3: DISEÑO CONCEPTUAL DEL ESPACIO AÉREO Código: EDI 1032.200.
- 17.- INECO. MADRID-BARAJAS TRAFFIC SAMPLES REPORT. (DMAN TRS139/WORK PACKAGE 2). 'Automated Support for Air Traffic Services Programme'.
- 18.- Kelly, J.R., Effect of lead-aircraft ground-speed quantization on self-spacing performance using a cockpit display of traffic information, NASA Technical Paper 2194, 1983.
- 19.- Offerman, H. y Bakker, M. Growing Pains of Major European Airports. Case Study: Amsterdam Airport Schiphol. National Aerospace Laboratory NLR. December 1998.

- 20.- SOURDINE, Final Report, PL97-3043. May 31, 2000.
- 21.- Gómez Comendador, V. F., Sáez Nieto, F. J. Determinación de condiciones de compatibilidad en un TMA de tamaño medio de procedimientos ACDA de empuje mínimo, y perfil vertical variable o perfil de velocidad variable, con procedimientos convencionales, minimizando su impacto sobre la capacidad. Universidad Politécnica de Madrid. Febrero 2004.
- 22- Tom G. Reynolds et al. History, Development and Analysis of Noise Abatement Arrival Procedures for U.K. Airports. AIAA 5th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum, Arlington, Virginia. Sep 26-28, 2005. AIAA 2005-7394.
- 23.- John Paul Clarke, et al. Development, Design and Flight Test Evaluation of a CDA procedure for Night Time Operations at Louisville Int. Airport. Report of the PARTNER CDA Development Team. Report No. PARTNER-ION 2005-02, January 9, 2006.
- 24.- Liling Ren and John-Paul B. Clarke. Georgia Institute of Technology. Separation Analysis Methodology for Designing Area Navigation Arrival Procedures. Journal Of Guidance, Control, And Dynamics Vol. 30, No. 5, September–October 2007.